

## Aplicación de sensores remotos al estudio de glaciares en el Cerro Aconcagua

Pierre Pitte  
Lidia Ferri Hidalgo  
Lydia Elena Espizua

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales IANIGLA-CONICET  
Av. Ruiz Leal S/N, Pque. Gral. San Martín, 5500 Mendoza

pierrepitte@lab.cricyt.edu.ar  
lferri@lab.cricyt.edu.ar  
lespizua@lab.cricyt.edu.ar

**Resumen.** El objetivo de este trabajo es revisar los métodos de procesamiento de información de sensores remotos utilizados para el estudio de los glaciares del Cerro Aconcagua. El inventario de glaciares realizado con fotografías aéreas de 1963 y basado en análisis visual brindó información de alta calidad pero requirió de una cantidad muy intensiva de horas-hombre. Los estudios de fluctuaciones de glaciares descubiertos han incorporado gran parte de las herramientas disponibles para procesamiento digital de imágenes: registro, correcciones atmosféricas, detección de superficie cubierta de hielo-nieve y mediciones. En cambio, en el estudio de glaciares cubiertos de detritos y glaciares de escombros, muy frecuentes en los Andes Centrales, las técnicas de procesamiento digital son una herramienta predictora y el análisis visual sigue siendo más eficaz. Este es el caso del glaciar Horcones Inferior, cuyos avances extraordinarios (*surge*) en 1986-1989 y 2004-2006 fueron analizados visualmente debido a la gran variabilidad en la textura, cobertura de hielo-nieve y contenido de humedad, que presenta la superficie del glaciar. En todos los casos las técnicas de procesamiento digital y un conocimiento empírico de los glaciares son la clave para obtener datos precisos y confiables. El criterio del analista influye en la delimitación de la superficie del glaciar, y en la selección del método más adecuado para medir su largo. El uso de una metodología uniforme y explícita permite integrar datos de estudios realizados en distintas fechas y con distintas técnicas.

**Palabras clave.** Fluctuaciones de glaciares, inventario de glaciares, imágenes satelitales

### 1.1. Introducción

Los glaciares del Cerro Aconcagua han sido el objeto de distintos estudios científicos incluyendo el inventario de glaciares (Corte y Espizua, 1981), estratigrafía glacial (Espizua, 1993; 2004), espesor de hielo (Brizuela, 1999), dinámica de glaciares en surge (Unger et al., 2001; Milana, 2007) y fluctuaciones de glaciares (Espizua y Maldonado, 2007; Espizua y Pitte, Aceptado). En la zona, además, se encuentran una gran diversidad de geoformas asociadas al ambiente glacial y periglacial, incluyendo: glaciares, manchones de nieve perennes, campos de penitentes, glaciares cubiertos, glaciares de escombros y morenas. Esta diversidad de geoformas ha sido un desafío para la implementación de algunas de las técnicas tradicionales empleadas en el estudio de glaciares.

El objetivo de este trabajo es hacer una revisión de la metodología empleada para procesar información de sensores remotos, utilizada en el estudio de los glaciares del Cerro Aconcagua. Se discuten alcances y limitaciones y se presentan algunos resultados obtenidos.

### 1.2 Área de estudio

El área de estudio es el macizo del Aconcagua. El Cerro Aconcagua y su área de influencia se encuentran dentro del Parque Provincial Aconcagua (70000 ha), ubicado a 180 km de la ciudad de Mendoza y 150 km de Santiago de Chile. La topografía montañosa abarca un amplio rango de alturas, entre 2850 msnm (valle del río Horcones) y 6959 msnm (Cerro

Aconcagua). Las temperaturas de verano en el valle varían entre los -5 y los 30 °C y las precipitaciones son del orden de 400-600 mm anuales y ocurren mayormente en invierno y en forma de nieve.

Este trabajo se enfoca en los glaciares, en especial los que están ubicados en las cuencas Horcones y Vacas (Fig. 1). Los glaciares de interés en este estudio son: Vacas, Güssfeldt y Horcones Inferior. En la zona también existen glaciares de escombros y otras geoformas (Corte y Espizua, 1981). Los frentes de los glaciares se sitúan entre los 3900 y 4400 msnm.



Figura 1. Ubicación del área de estudio.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Análisis visual de información de sensores remotos

El primer estudio a gran escala, realizado en base a sensores remotos en la zona, fue el inventario de glaciares de la cuenca del Río Mendoza (Corte y Espizua, 1981). Este inventario fue uno de los primeros realizados para Sudamérica y se basó en la interpretación de fotos aéreas en blanco y negro, de 1963, en escala 1:50000. La información obtenida fue llevada a planos en escala 1:50000. Las geoformas se identificaron mediante análisis visual con estereoscopio, se dibujaron manualmente y se realizaron las mediciones con escalímetro. Finalmente se clasificaron y tabularon la totalidad de los datos.

Entre 1984 y 1989 el glaciar Horcones Inferior entró en una fase activa de *surge* (avance extraordinario). El glaciar Horcones Inferior tiene una importante cobertura de detritos por lo que en su fase pasiva es difícil distinguirlo del talud que lo rodea. En su fase activa el glaciar presenta una superficie muy irregular con mayor humedad y hielo descubierto, lo que facilita su identificación con sensores remotos. El *surge* se detectó y monitoreó con imágenes satelitales Landsat 5 TM y, debido a que el glaciar era accesible, pudo realizarse trabajo de campo para corroborar las observaciones realizadas. Las imágenes fueron trabajadas en RGB con distintas combinaciones de bandas (741, 742, 754, 543). Las distintas posiciones se localizaron sobre un mapa base, producto de una restitución fotogramétrica realizada con fotos aéreas, en blanco y negro, de 1974 (Unger et al., 2001).

### 2.2 Análisis digital de información de sensores remotos

El primer estudio de fluctuaciones de glaciares de Aconcagua se publicó en 2007 (Espizua y Maldonado, 2007) y fue complementado en 2008 (Espizua y Pitte, Aceptado). Estos trabajos presentan las fluctuaciones de los glaciares Güssfeldt y Vacas desde 1895 hasta 2007. Las fuentes incluyen: observaciones de terreno, fotografías aéreas e imágenes satelitales Landsat. En estos trabajos se planteó una metodología basada en procesamiento y análisis digital de imágenes. Para ello, el material fue rectificado (registrado) sobre la base de las imágenes Geocover (Tucker et al., 2004). Las fotografías aéreas no fueron orto-rectificadas debido a que no se contaba con los parámetros de las cámaras ni con puntos de control de terreno. En cambio, se rectificaron junto con las imágenes satelitales. Las superficies de los glaciares fueron digitalizadas manualmente en el caso de la información histórica y de las fotografías aéreas.

La detección de superficies cubiertas por hielo y nieve en las imágenes satelitales, se realizó mediante el método de Dozier (1989). Este método se basa en la intersección de la superficie obtenida con el Índice de Nieve (NDSI) y el área definida por la aplicación de un umbral en la banda 1. El NDSI (1) se basa en la particular respuesta espectral de la nieve con alta reflectividad en el visible y baja en el infrarrojo, Figura 3.

$$\text{NDSI} = (\text{TM2} - \text{TM5}) / (\text{TM2} + \text{TM5}) \quad (1)$$

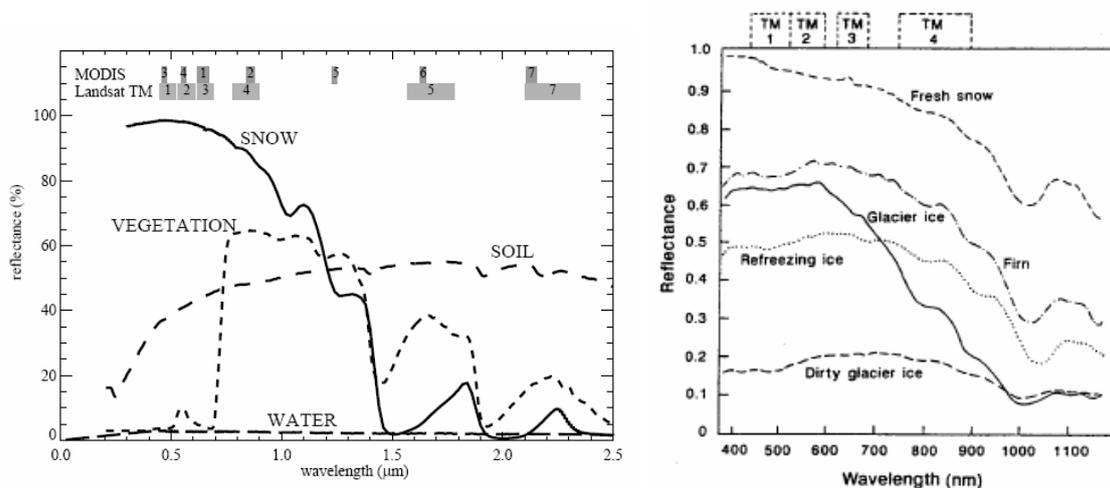


Figura 3: Izquierda: Firmas espectrales de la nieve (snow), la vegetación (vegetation), el suelo (soil) y el agua (water). La figura indica la resolución radiométrica de las bandas de los sensores Landsat y Modis (Klein et al., 1998). Derecha: diferencias en el comportamiento espectral de distintos tipos de nieve y hielo: nieve fresca (fresh snow), firn (firn), hielo glaciar (glacier ice), hielo superimpuesto (refreezing ice) y hielo cubierto de detrito (dirty glacier ice) (König et al., 2001).

Para aplicar el método de Dozier, las imágenes satelitales fueron convertidas a valores de reflectividad mediante un algoritmo simplificado de correcciones atmosféricas que incluye un ajuste por la refracción en las longitudes de onda menores, especialmente en la Bandas 1 y 2 (Chavez, 1996). Esta conversión reduce parcialmente el efecto de diferencias en las condiciones de insolación de las escenas y es necesaria para análisis multitemporal (Song et al., 2001). La delimitación de la superficie cubierta por glaciares mediante un método estandarizado empleando técnicas de procesamiento digital de imágenes, facilita la delimitación y reduce la variabilidad que se produce por la interpretación del operario. No obstante, no soluciona el problema de tener que definir los largos de los glaciares.

## 2.3 Medición del largo de los glaciares

La variación de largo de los glaciares es uno de los principales parámetros que se miden. Las fluctuaciones de los frentes de los glaciares se consideran una de las manifestaciones más claras del cambio climático. No obstante, la señal climática que contienen se encuentra filtrada y diferida (IUGG (CCS)/UNEP/UNESCO, 2005). La medición de la posición del frente del glaciar puede realizarse por distintos métodos. Uno de los más precisos y utilizados fue la topografía de campo mediante la utilización de teodolitos convencionales. También pueden realizarse mediciones entre un punto fijo conocido y el frente del glaciar. Mas recientemente, y enfocado en mediciones realizadas con material de percepción remota (fotografías aéreas e imágenes satelitales), el Servicio Mundial de Monitoreo de Glaciares (WGMS) define el largo del glaciar como: “el mayor largo por la línea de flujo principal” (IUGG (CCS)/UNEP/UNESCO, 2005). Este método requiere de tener información de toda la extensión del glaciar, mientras que los métodos anteriores pueden realizarse teniendo únicamente información del frente. Un problema común a todos los métodos es realizar la medición de un frente irregular. Cuando el frente no tiene la característica forma lobulada, surge la posibilidad de medir: la extensión mayor, una media de posición del frente o la posición de la parte central (eje). Hay una cierta discusión en torno a cual de estas medidas es la más representativa. No obstante, queda claro que la metodología debe ser explícita y mantenerse en todo el trabajo, de modo de asegurar la homogeneidad de los datos. En los trabajos citados se midió sobre la línea de flujo principal que pasa por el eje del glaciar.

## **2.4 Detección de hielo cubierto por detrito**

En los Andes Centrales los glaciares se desarrollan en ambientes áridos muy por encima de la línea de vegetación. En estos ambientes los ciclos de congelamiento y descongelamiento fracturan las rocas y generan una gran cantidad de detrito. Este detrito puede dar origen a glaciares de escombros de origen primario o secundario. En el primer caso se trata la movilización del talud saturado con hielo intersticial. En el segundo caso se trata de glaciares *sensu stricto* que se cubren progresivamente con el aporte de detritos, el hielo en el interior de estos cuerpos es masivo (Corte, 1983; Haeberli, 1985). Los glaciares de escombros son geoformas de difícil detección mediante métodos de análisis digital, especialmente si las imágenes originales son de resolución media. En análisis visual, los glaciares de escombros se reconocen por sus formas y los lineamientos de flujo en su superficie, que recuerdan a campos de lava. Debido a que estos glaciares están constituidos por el mismo material que el talud que los rodea, la diferenciación espectral es compleja. La figura 3 muestra como la nieve pierde reflectividad en la porción del visible a medida que se transforma en hielo y/o se cubre de detritos. En la actualidad, se están desarrollando métodos predictores que utilizan parámetros de modelos de elevación: pendiente, curvatura e insolación (Brenning y Trombotto, 2006). Estas técnicas han sido empleadas con cierto éxito en los Andes Centrales de Chile pero no se han utilizado en Aconcagua. Como se mencionó, esta técnica se basa en un modelo predictor que requiere verificación en el campo o mediante interpretación de fotografías aéreas. Por este motivo, en su fase actual de desarrollo, no presenta grandes ventajas sobre la interpretación visual de fotografías aéreas. Para el estudio del *surge* reciente (2004-2006) del glaciar cubierto Horcones Inferior, se rectificaron las imágenes con el método mencionado previamente pero la superficie del glaciar se digitalizó manualmente.

## **2.5 Utilización de sistema de información geográfica**

En los trabajos realizados mediante análisis digital, los datos fueron cargados en un sistema de información geográficos (GIS). La utilización del GIS facilita la integración y el análisis de toda la información. Las mediciones de largos y áreas de glaciares se realizan por

convención en superficies proyectadas (ICSU (FAGS)/IUGG (IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, 2008) y los resultados se presentan en tablas y gráficos. Una de las representaciones gráficas más comunes de las fluctuaciones de los glaciares es la variación acumulada de largo.

### 3. Resultados

#### 3.1 Inventario de glaciares

El inventario de glaciares de la cuenca del Río Mendoza permitió conocer las superficies de glaciares de cada sub-cuenca. Este inventario incluyó la medición y clasificación de distintas geformas del ambiente glacial y periglacial. Algunos de los resultados de las cuencas del área de estudio se sintetizan en la Tabla 1. El inventario disponible es una base muy útil para comparar con datos modernos y cuantificar los cambios en los glaciares de la zona de estudio.

Tabla 1. Resultados del inventario de glaciares de las cuencas de Aconcagua, realizado con fotos aéreas de 1963 (Corte y Espizua, 1981).

Cuenca	Area	Hielo descubierto		Morenas Holoceno		Termocarst		Glaciares de escombros	
	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Quebrada de Horcones	197.02	9.46	5%	4.96	3%	8.57	4%	9.91	5%
Río de las Cuevas	377.73	9.68	3%	2.97	1%	7.12	2%	9.03	2%

#### 3.2 Fluctuaciones de los glaciares

Los estudios de fluctuaciones de los Glaciares Vacas y Güssfeldt han permitido conocer la evolución de estos glaciares en el último siglo, cuantificando los cambios y aportando elementos para determinar el efecto de los cambios en las precipitaciones y en las temperaturas en las superficies de glaciares descubiertos.

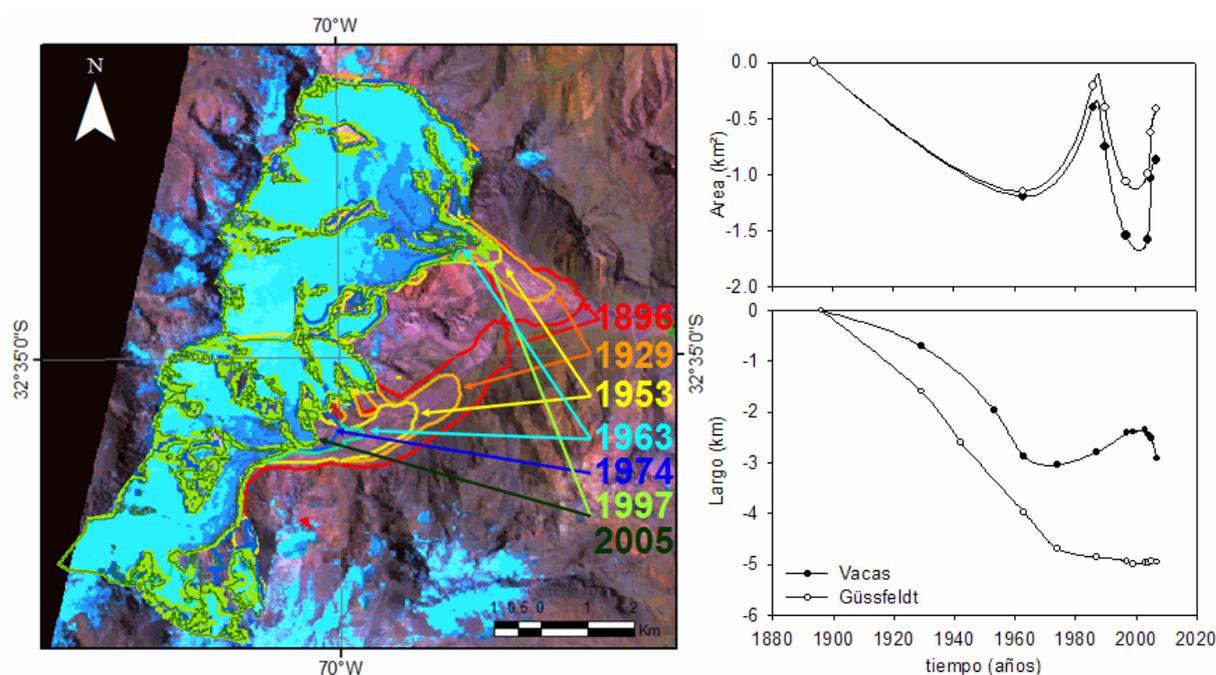


Figura 4: Fluctuaciones de los glaciares Vacas (norte) y Güssfeldt (sur). En los gráficos se presenta la variación acumulada de área (arriba) y de largo (abajo) (adaptado de: Espizua y Pitte, Aceptado)

### 3.3 Monitoreo de un glaciar cubierto

El surge 2004-2006 del glaciar Horcones Inferior fue estudiado con imágenes satelitales. El frente del glaciar avanzó 3.08 km con una velocidad media de avance de 8.5 m/día (ICSU (FAGS)/IUGG (IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, 2008).

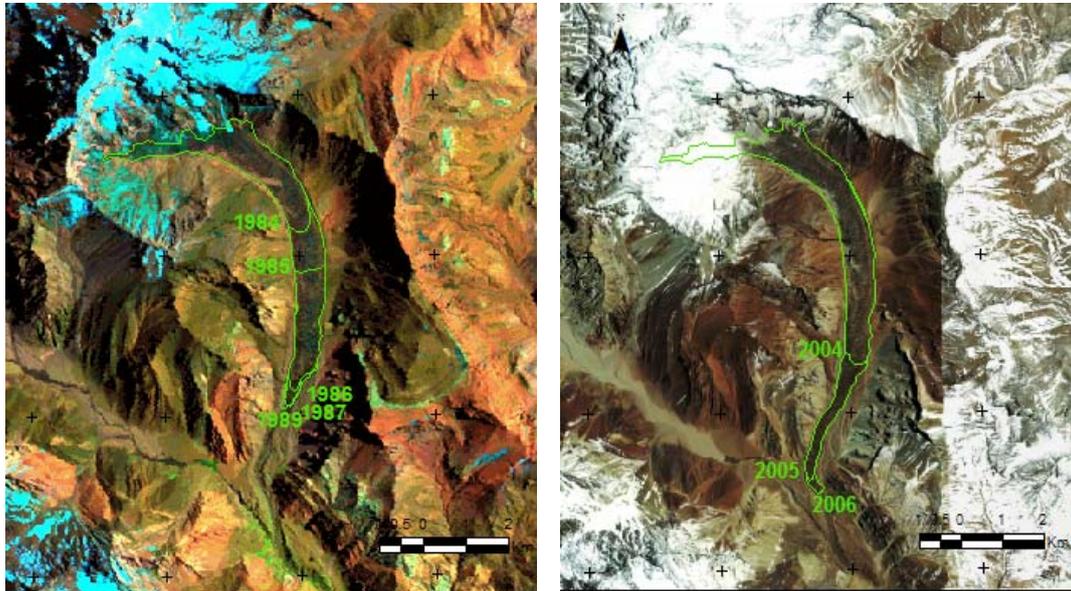


Figura 5: Monitoreo de dos episodios de *surge* del glaciar Horcones Inferior. Izquierda: composición 741 de la imagen Geocover 1987 (USGS-Maryland) Derecha: imagen SPOT 2006 (Google Earth).

### 4 Discusión

El caso del Cerro Aconcagua es de particular interés ya que la diversidad de geofomas y procesos del ambiente glacial y periglacial presentes son un gran desafío para el uso de sensores remotos. Los estudios de fluctuaciones de glaciares descubiertos han incorporado gran parte de las herramientas disponibles para procesamiento digital de imágenes. También existen, en la actualidad guías de gran ayuda para procesar de forma homogénea la información obtenida. No obstante, la función del analista sigue estando presente en una multitud de decisiones a la hora de procesar la información, por ejemplo en la selección del método para medir los largos. Por este motivo, es fundamental que junto a habilidades en el proceso de la información de sensores remotos, tenga un conocimiento empírico de los glaciares. Esto es particularmente importante para los glaciares de escombros, en los que las técnicas de procesamiento digital son, en el mejor de los casos, una herramienta predictora.

En los últimos años han hecho su aparición imágenes de alta resolución de gran utilidad en el estudio de glaciares, especialmente para identificar hielo cubierto. La imagen SPOT disponible en Google Earth del glaciar Horcones Inferior (Figura 5) es un claro ejemplo de la notable calidad de información que brindan estos sensores. Lamentablemente los precios de las imágenes de alta resolución son aún prohibitivos para realizar estudios ambientales a gran escala. En este sentido la política de Brasil con respecto al sensor HRC del CBERS es una gran oportunidad para realizar estudios de base como son los inventarios de glaciares. También es un ejemplo para otros países de América del Sur, donde gran parte de la información ambiental está injustificadamente inaccesible para estudios ambientales.

### 5 Conclusiones

En la zona del Cerro Aconcagua se han realizado un importante número de estudios en base a sensores remotos. El inventario de glaciares realizado con fotografías aéreas de 1963 y basado en análisis visual brindó información de alta calidad de una gran diversidad de geoformas, pero requirió de una cantidad muy intensiva de horas hombre que lo hace poco factible en la actualidad. Más recientemente, los estudios de fluctuaciones de glaciares descubiertos han incorporado gran parte de las herramientas disponibles para procesamiento digital de imágenes: rectificación (registro), correcciones atmosféricas, detección de superficie cubierta de hielo-nieve, delimitación de cuencas y mediciones. En cambio, en el estudio de glaciares de escombros, muy frecuentes en los Andes Centrales, las técnicas de procesamiento digital son, en el mejor de los casos, una herramienta predictora y el análisis visual sigue siendo más eficaz. En el caso de los *surge* (avance extraordinario) del Horcones Inferior en 1986-1989 y 2004-2006, la herramienta más eficiente fue la digitalización manual debido a la gran variabilidad en la textura, cobertura de hielo-nieve y contenido de humedad, que presenta la superficie del glaciar durante la fase activa. En todos los casos el manejo de las técnicas de procesamiento digital por parte del analista, así como un conocimiento empírico de los glaciares que se están estudiando, es fundamental para obtener datos precisos y confiables. El criterio del analista influye en la delimitación de la superficie de hielo y nieve, especialmente cuando hay cobertura de detritos, y en la selección del método más adecuado para medir el largo. Por estos motivos es necesario emplear una metodología explícita de modo de poder integrar estudios realizados en distintas fechas y con distintas técnicas.

## **Agradecimientos**

Las imágenes Landsat empleadas en este trabajo fueron entregadas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Las imágenes Landsat del Geocover fueron obtenidas de la página Earth Science Data Interface (USGS-Maryland). Los autores agradecen a la Dirección de Recursos Naturales de la Provincia de Mendoza, por facilitar el ingreso al Parque Provincial Aconcagua para realizar el trabajo de campo.

## **Referencias**

- Brenning, A. y D. Trombotto. 2006. Logistic regression modeling of rock glacier and glacier distribution: Topographic and climatic controls in the semi-arid Andes. **Geomorphology** 81: 141-154.
- Brizuela, K. 1999. **Estudio geofísico de glaciares en el valle del Colorado (Dpto. Calingasta) y en el sector sur del Cerro Aconcagua**. Tesis de grado (Licenciatura en Geología). Departamento de Geofísica. Universidad Nacional de San Juan. San Juan. 120.
- Corte, A.E. 1983. **Geocriología. El frío en la Tierra**. Ediciones Culturales de Mendoza, Mendoza. 398.
- Corte, A.E. y L.E. Espizua. 1981. **Inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza**. IANIGLA-CONICET, Mendoza. 64.
- Chavez, P.S. 1996. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing** 62: 1025-1036.
- Dozier, J. 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. **Remote Sensing of Environment** 28: 9-22.
- Espizua, L. y G. Maldonado. 2007. Glacier variations in the Central Andes (Mendoza province, Argentina) from 1896 to 2005. In: **Environmental change and rational water use**. Scarpati, O. y A. Jones (Eds.). Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires. 353-366.

- Espizua, L. y P. Pitte. Aceptado. The Little Ice Age advance in the Central Andes (35° S), Argentina. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**
- Espizua, L.E. 1993. Quaternary glaciations in the Rio Mendoza Valley, Argentine Andes. **Quaternary Research** 40: 150-162.
- Espizua, L.E. 2004. Pleistocene glaciations in the Mendoza Andes. In: **Quaternary Glaciations - Extent and Chronology, Part III**. Ehlers, J. y P. L. Gibbard (Eds.).Elsevier. 69-73.
- Haeberli, W. 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. **Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie** 77: 143.
- ICSU (FAGS)/IUGG (IACS)/UNEP/UNESCO/WMO. 2008. **Fluctuations of glaciers 2000-2005, Vol. IX**. World Glacier Monitoring Service, Zurich.
- IUGG (CCS)/UNEP/UNESCO. 2005. **Fluctuations of glaciers 1995-2000, Vol. VIII**. World Glacier Monitoring Service, Zurich. 307.
- Klein, A.G., D. Hall y G.A. Riggs. 1998. Improving snow-cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model. **Hydrological Processes** 12(10-11): 1723-1744.
- König, M., J.G. Winther y E. Isaksson. 2001. Measuring snow and ice properties from satellite. **Reviews of Geophysics** 39(1): 1-27.
- Milana, J.P. 2007. A model of the Glaciar Horcones Inferior surge, Aconcagua region, Argentina. **Journal of Glaciology** 53(183): 565-572.
- Song, C., C.E. Woodcock, K.C. Seto, M.P. Lenney y S.A. Macomber. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing and Environment** 75: 230-244.
- Tucker, C.J., D.M. Grant y J.D. Dystra. 2004. NASA's global orthorectified Landsat data set. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** 70(3): 313-322.
- Unger, C., L.E. Espizua y R. Bottero. 2001. Untersuchung von Gletscherständen im Tal des Río Mendoza (zentralargentinische Anden) - Kartierung auf eines Surge-vorstosses des Horcones Inferior. **Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie** 36: 151-157.